

Н. С. СИУНОВ, П. И. ОСТАНКОВ,  
И. Ф. МИЛАЙКИН

# РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА ОДНОФАЗНОГО СИНХРОННОГО СВАРОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

## Генератор без демпферной обмотки

Уравнения напряжений и потокосцеплений обмоток однофазной машины имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \psi_a + i_a r_a + u_a &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial t} \psi_f + i_f r_f &= u_f;\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}\psi_a &= i_a L_a + i_f M_{af}; \\ \psi_f &= i_f L_f + i_a M_{af},\end{aligned}\tag{2}$$

где  $\psi_a, \psi_f, i_a, i_f$  — потокосцепления и токи обмоток якоря и возбуждения;

$L_a, L_f, r_a, r_f$  — индуктивности и активные сопротивления обмоток;

$u_a, u_f$  — напряжение обмотки якоря и напряжение, подводимое к обмотке возбуждения;

$M_{af}$  — взаимная индуктивность обмоток.

Магнитная проницаемость стали принимается равной бесконечности. Взаимная индуктивность  $M_{af}$  не зависит от числа включенных параллельных ветвей (п. в.) обмотки якоря, так как э. д. с. холостого хода во всех ветвях простой петлевой обмотки якоря одинакова. С изменением числа включенных п. в. изменяются только параметры обмотки якоря, а поскольку поток взаимной индукции между обмотками при одном и том же токе якоря не зависит от числа включенных п. в., индуктивность обмотки якоря может изменяться только за счет изменения потоков рассеяния обмотки.

Для простоты рассмотрим неявнополюсную машину с сосредоточенной обмоткой якоря, имеющей число п. в., равное числу полюсов. Предположим, что ротор неподвижен и оси полюсных катушек совпадают с осями катушек якоря. Если включить только одну п. в. и питать ее постоянным током, то кривая индукции в воздушном зазоре будет содержать пространственные

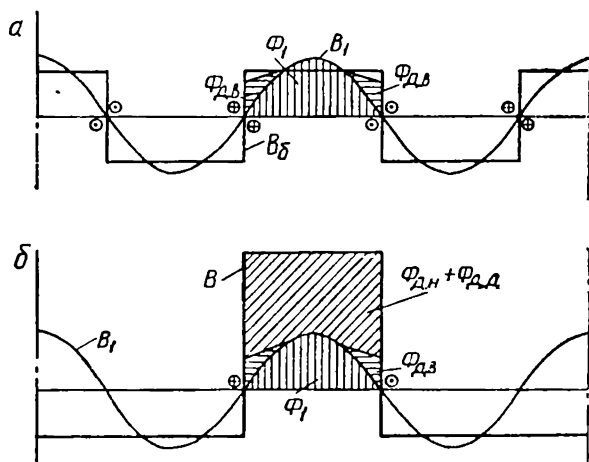


Рис. 1. Кривые индукции  $B_1$ ,  $B$  и потоки основной гармоник  $\Phi_1$  и дифференциального рассеяния обмотки якоря при питании четырех (а) и одной (б) п. в. одинаковым током.  $\Phi_{д.в}$ ,  $\Phi_{д.н}$ ,  $\Phi_{д.д}$  — соответственно потоки дифференциального рассеяния высших, низших и дробных гармоник кривой индукции.

гармоники порядка  $\frac{m}{p}$ , где  $m=1, 2, 3, \dots$ , а  $p$  — число пар полюсов. Если же питать все п. в., то в кривой индукции будут только нечетные гармоники.

Таким образом, при переходе от полного числа включенных п. в. к одной п. в. в кривой индукции воздушного зазора появляются дополнительно низшие и дробные гармоники, потоки которых, замыкаясь по железу якоря и индуктора через воздушный зазор, не дают потокосцеплений с обмоткой возбуждения. При большом числе п. в. эти потоки могут значительно превосходить поток основной гармоник якоря. Следовательно, при переходе от полного числа включенных п. в. к одной включенной п. в. индуктивность обмотки якоря резко увеличивается в результате роста составляющей дифференциального рассеяния.

На рис. 1 приведены кривые индукции, а также потоки основной гармоник и дифференциального рассеяния обмотки якоря для одной и 4 включенных п. в. неявнополюсной машины, имеющей 4 полюса.

Зависимость индуктивности однослойной неперекрещивающейся обмотки якоря от числа включенных параллельных ветвей. Пусть обмотка якоря имеет число п. в., равное числу полюсов, т. е. каждая п. в. состоит из одной катушечной группы (рис. 2). Пренебрегая потоками взаимной индукции пазового и лобового рассеяния катушечных групп, можно принять взаимные индуктивности любой пары п. в. одинаковыми по абсолютной величине. Тогда выражения для потокосцеплений п. в. можно записать:

$$\begin{aligned}\psi_n &= i_n L_k - (a_n - 1) i_n M + a_q i_q M + i_f M_{af}; \\ \psi_q &= i_q L_k - (a_q - 1) i_q M + a_n i_n M + i_f M_{af}.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь  $a_q$ ,  $a_n$  — число включенных четных и нечетных п. в.;  $\psi_q$ ,  $\psi_n$ ,  $i_q$ ,  $i_n$  — потокосцепления и токи соответствующих п. в.;  $L_k$  — индуктивность параллельной ветви;  $M$  — взаимная индуктивность между четной и нечетной параллельными ветвями.

Пренебрегая активным сопротивлением п. в., можно считать, что потокосцепления всех включенных п. в. одинаковы. Совместное решение уравнений (3) дает

$$i_q = i_n K; \quad (4)$$

$$i_a = i_n (a_n + K a_q); \quad (5)$$

$$K = \frac{L_k - M(2a_n - 1)}{L_k - M(2a_q - 1)}. \quad (6)$$

Из (3) с учетом (4), (5) получим

$$\psi_n = \psi_q = \psi_a = i_a \frac{L_k - M(a_n - K a_q - 1)}{a_n + K a_q} + i_f M_{af}. \quad (7)$$

Сравнивая (7) и (2), получим

$$L_a = \frac{L_k - M(a_n - K a_q - 1)}{a_n + K a_q}. \quad (8)$$

Для случая включения одних четных или нечетных п. в. выражения (6), (8) не справедливы, так как  $\psi_n \neq \psi_q$ . В этом случае, а также для обмотки с  $a=p$  коэффициент  $K=1$  и

$$L_a = \frac{L_k - M(a - 1)}{a}. \quad (9)$$

Если обмотка якоря выполнена таким образом, что в одной параллельной ветви последовательно соединено  $n$  катушечных групп, причем разность между числом последовательно соединен-

ных четных и нечетных катушечных групп равна  $d$ , то можно показать, что

$$K = \frac{nL_k - M(2d^2a_n - n)}{nL_k - M(2d^2a_q - n)}, \quad (10)$$

а

$$L_u = \frac{nL_k - M(d^2a_n - Kd^2a_q - n)}{a_n + Ka_q}. \quad (11)$$

Анализ выражения (10) при  $d=1$  показал, что коэффициент неравномерности распределения токов  $K$  при любых сочетаниях включенных п. в. близок к 1. При  $d=n$  уравнение (10) приводится к выражению вида (8), анализ которого показывает, что коэффициент  $K$  резко изменяется с ростом разности между числом четных и нечетных п. в., включенных для работы, а при постоянной разности — с увеличением общего числа включенных п. в.

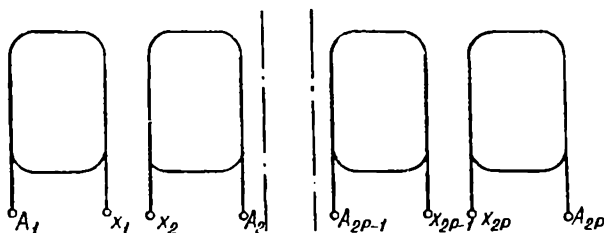


Рис. 2. Схема расположения параллельных ветвей.

При этом ток будет иметь большее значение в тех п. в., которых больше включено. Например, если включено  $p$  четных ветвей, то при дополнительном подключении  $1, 2, 3, \dots, (p-1)$  нечетных ветвей ток в каждой четной ветви будет больше, чем в нечетной, причем при включении  $(p-1)$  нечетных ветвей коэффициент  $K$  будет иметь значение порядка нескольких единиц в зависимости от относительной величины индуктивности пазового и лобового рассеяния. Ориентировочно можно сказать, что коэффициент  $K$  не будет превышать 1, 5, если разность между числом включенных четных и нечетных п. в. равна 1, а сумма — не более половины общего числа п. в. обмотки.

Расчет индуктивностей  $L_k$  и  $M$  нужно вести по полному потоку воздушного зазора, так как поток основной гармоники катушечной группы составляет небольшую часть всего потока воздушного зазора.

Если воспользоваться методом удельной магнитной проводимости [1] и определять значения проводимости по двум первым членам ряда Фурье, то в выражениях для  $L_k$  и  $M$  также можно ограничиться двумя членами ряда Фурье. В частности, для кату-

шечной группы, состоящей из одной катушки с шагом, равным  $\beta\tau$ , имеем:

$$L_k = L_{ks} + \frac{\tau}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 l_z}{\delta} \omega^2 \left[ \left( 1 - \frac{\beta}{2p} \right) \lambda_0 \pi \beta - \frac{\lambda_2^2}{\lambda_0} \cdot \frac{\sin^2 \pi \beta}{4\pi p} + \left( 1 - \frac{\beta}{2p} \right) \lambda_2 \sin \pi \beta \cos 2\gamma \right]; \quad (12)$$

$$M = \frac{\tau}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 l_z}{\delta} \omega^2 \left( \frac{\beta^2}{2p} \lambda_0 \pi + \frac{\lambda_2^2}{\lambda_0} \cdot \frac{\sin^2 \pi \beta}{4\pi p} + \frac{\beta}{2p} \lambda_2 \sin \pi \beta \cos 2\gamma \right), \quad (13)$$

где  $L_{ks}$  — индуктивность пазового и лобового рассеяния катушечной группы;

$\tau$  — полюсное деление;

$l_z$  — расчетная длина якоря;

$\delta$  — воздушный зазор по оси полюса;

$\lambda_0, \lambda_2$  — гармонические составляющие удельной магнитной проводимости воздушного зазора;

$\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха;

$\omega$  — число витков катушечной группы обмотки якоря;

$\beta$  — коэффициент сокращения шага обмотки;

$\gamma$  — угол между осями обмоток якоря и индуктора.

Для катушечной группы, состоящей из нескольких секций, выражения (12), (13) будут отличаться тем, что коэффициент  $\beta$  умножается на коэффициент, который учитывает распределение обмотки и зависит от числа секций в катушечной группе и типа обмотки.

Можно показать, что для большинства сочетаний включения четных и нечетных п. в. выражение индуктивности обмотки якоря имеет вид

$$L_a = L_0 + L_2 \cos 2\gamma, \quad (14)$$

где  $L_0$  и  $L_2$  — постоянная и переменная составляющие индуктивности обмотки якоря, зависящие от числа и взаимного расположения включенных п. в.

Исключение составляют такие сочетания включения четных и нечетных п. в., при которых имеет место большая неравномерность распределения токов по ветвям и, следовательно, коэффициент  $K$  может иметь значительную составляющую, зависящую от углового положения ротора.

**Ток короткого замыкания генератора при различном числе включенных п. в.** В сварочном генераторе с крутопадающими внешними характеристиками зависимость рабочего тока от числа включенных п. в. с достаточной точностью определяется аналогичной зависимостью тока короткого замыкания. Решив системы уравнений (1), (2) для режима установившегося к. з. при условиях:

$$\begin{aligned}
 r_a &= 0; \\
 M_{af} &= M_{afd} \cos \gamma; \\
 L_a &= L_0 + L_2 \cos 2\gamma,
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

получим

$$i_a = - \frac{i_{f_0} x_{ad1}}{\frac{x_{d1} + \sqrt{x_{d1}' x_{q1}}}{2}} (\cos \gamma + b \cos 3\gamma + b^2 \cos 5\gamma + \dots); \tag{16}$$

$$i_f = i_{f_0} + \frac{(x_{d1} - x_{d1}') i_{f_0} (1+b)}{\frac{x_{d1} + \sqrt{x_{d1}' x_{q1}}}{2}} (\cos 2\gamma + b \cos 4\gamma + b^2 \cos 6\gamma + \dots), \tag{17}$$

где  $M_{afd}$  — коэффициент взаимной индукции обмоток якоря и индуктора при совпадении их осей;

$x_{ad1}$  — индуктивное сопротивление взаимной индукции

$$x_{ad1} = \omega M_{afd};$$

$x_{d1}$  — индуктивное сопротивление обмотки якоря при совпадении осей обмоток якоря и индуктора

$$x_{d1} = \omega (L_0 + L_2);$$

$x_{q1}$  — индуктивное сопротивление обмотки якоря при совпадении ее оси с поперечной осью индуктора

$$x_{q1} = \omega (L_0 - L_2);$$

$x_{d1}'$  — переходная индуктивность обмотки якоря

$$x_{d1}' = (1 - k_c) x_{d1};$$

$k_c$  — коэффициент связи обмоток

$$k_c = \frac{x_{ad1}^2}{x_{d1} x_f};$$

$x_f$  — индуктивность обмотки возбуждения;

$\omega$  — угловая частота;

$i_{f_0}$  — постоянная составляющая тока возбуждения;

$$b = \frac{\sqrt{x_{d1}} - \sqrt{x_{d1}'}}{\sqrt{x_{q1}} + \sqrt{x_{d1}'}}.$$

С изменением числа включенных п. в. параметры  $L_f$ ,  $M_{afd}$  остаются постоянными, а значение  $L_a$  определяется согласно (8), (9), (11). Отметим, что в (16), (17) входят параметры однофазной машины, которые для машины без демпферной обмотки при не-вращающемся роторе можно определить экспериментально.

Для макета, выполненного на базе опытного образца сварочного генератора с 12 полюсами типа СГС-300, были получены экспериментально и рассчитаны по (8), (9), (12), (13), (16) значения токов к. з. при различном числе и взаимном расположении включенных п. в. Сравнение показало, что при ненасыщенной магнитной цепи расхождения не превышают 10%.

### Генератор с демпферной обмоткой

Предположим, что на индукторе установлена очень мощная демпферная обмотка. В первом приближении можно считать, что пространственные поля низших и дробных гармоник, а также обратное синхронное поле основной гармоник обмотки якоря полностью демпфируются. Тогда ток короткого замыкания

$$I_{к.з.} = \frac{E}{x_1},$$

где  $E$  — э. д. с. холостого хода обмотки якоря;

$x_1$  — индуктивное сопротивление прямо бегущего поля якоря (в относительных единицах равно примерно  $0,5x_{ad1}$ ).

Поскольку индуктивность взаимоиндукции обмоток якоря и индуктора не зависит от числа включенных п. в., то ни  $x_1$ , ни ток к. з. не будет изменяться при изменении числа включенных п. в. В действительности же коэффициент демпфирования всегда меньше 1. Поэтому регулирование тока возможно и при наличии демпферной обмотки, однако пределы регулирования будут в несколько раз меньше. Это подтверждается экспериментальными данными, полученными при испытаниях генератора когтеобразной конструкции с демпферной обмоткой.

Если обмотка возбуждения генератора без демпферной обмотки имеет параллельные ветви, то низшие и дробные гармоники также будут демпфироваться и пределы регулирования тока будут меньше, чем у того же генератора при последовательном соединении полюсных катушек. Заметим, что уменьшение пределов регулирования может привести к росту плотности тока в ветви с уменьшением числа включенных п. в.

### ВЫВОДЫ

1. Увеличение индуктивности обмотки якоря с уменьшением числа включенных п. в. происходит за счет полей низших и дробных гармоник дифференциального рассеяния.

2. Включение неравного числа четных и нечетных п. в. у генератора, имеющего общее число п. в., равное  $2p$ , вызывает неравномерную загрузку ветвей.

3. Запись уравнений однофазной синхронной машины без демпферной обмотки в параметрах неподвижной однофазной машины позволяет сравнительно просто и с достаточной точностью получить расчетные значения токов якоря при любом числе включенных п. в.

4. Наличие демпферной обмотки в индукторе или параллельных ветвей в обмотке возбуждения уменьшает пределы регулирования тока переключением параллельных ветвей обмотки якоря.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Вольдек. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей. «Электричество», 1966, № 7.

2. А. И. Вольдек, Р. А. Лахтметс. Магнитная проводимость воздушного зазора и расчет магнитного поля явнополюсных синхронных машин. Изв. вузов, Электромеханика, 1968, № 6.

3. А. И. Важнов. Основы теории переходных процессов синхронной машины. М. — Л., ГЭИ, 1960.

---